



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
CURSO DE INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

JOÃO JONATAN SILVA NUNES

**REVISÃO HISTÓRICA E ASPECTOS TECNOLÓGICOS INFLUENCIADOS PELA
TEORIA DA RELATIVIDADE RESTRITA.**

CARAÚBAS

2023

JOÃO JONATAN SILVA NUNES

**REVISÃO HISTÓRICA E ASPECTOS TECNOLÓGICOS INFLUENCIADOS PELA
TEORIA DA RELATIVIDADE RESTRITA**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como requisito
para obtenção do título de Bacharel em 2023.

Orientador: Prof. Dr. Mackson Matheus França
Nepomuceno - UFERSA

CARAÚBAS

2023

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

N972r Nunes, João Jonatan Silva.
REVISÃO HISTÓRICA E ASPECTOS TECNOLÓGICOS
INFLUENCIADOS PELA TEORIA DA RELATIVIDADE
RESTRITA / João Jonatan Silva Nunes. - 2023.
38 f. : il.

Orientador: Mackson Matheus França Nepomuceno.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2023.

1. Relatividade Restrita. 2. Engenharia. 3.
Física Moderna. 4. Tecnologias. I. Matheus França
Nepomuceno, Mackson, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo autor(a).
Biblioteca Campus Caraúbas
Bibliotecária: Dalvanira Brito Rodrigues
CRB: 15/700

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

JOÃO JONATAN SILVA NUNES

**REVISÃO HISTÓRICA E ASPECTOS TECNOLÓGICOS INFLUENCIADOS PELA
TEORIA DA RELATIVIDADE RESTRITA**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como requisito
para obtenção do título de Bacharel em 2023.

Defendida em: **16/05/2023**

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente



MACKSON MATHEUS FRANÇA NEPOMUCENO

Data: 23/05/2023 13:56:13-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Mackson Matheus França Nepomuceno (UFERSA)
Presidente

ANA TEREZA DE ABREU
LIMA: [REDACTED]

Assinado de forma digital por ANA

TEREZA DE ABREU

LIMA: [REDACTED]

Dados: 2023.05.23 14:55:49 -03'00'

Profª. Dra. Ana Tereza Abreu Lima (UFERSA)

Membro Examinador

Francisco César de
Medeiros Filho

Assinado de forma digital por Francisco César de Medeiros Filho

DN: cn=Francisco César de Medeiros Filho,

email=[REDACTED], c=BR

Dados: 2023.05.23 17:31:11 -03'00'

Versão do Adobe Acrobat Reader: 2023.001.20174

Prof. Dr. Francisco César de Medeiros Filho (UFERSA)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da minha vida, a qual me fez trilhar o caminho para que estivesse aqui nesse momento tão gratificante pessoal e profissionalmente, instante esse que chega depois de muitas batalhas travadas, mas que no fim saio vitorioso.

Agradeço a minha família, em especial meus pais e avós maternos, que estiveram sempre a meu lado dando-me força e coragem mesmo nos momentos mais difíceis. A cada um deles dedico essa conquista.

Agradeço ao meu orientador e brilhante professor Dr. Mackson Matheus França Nepomuceno pela paciência e didática fenomenais, dádivas essas que me abrilhantaram no percurso do Trabalho de Conclusão de Curso e fizeram do mesmo uma tarefa menos pesada em função de sua grandiosa inteligência.

Agradeço a banca examinadora por estar presente e tomar um pouquinho de tempo para avaliar o meu trabalho, pois sei o quanto é exaustivo o trabalho de professor universitário. Bastante grato!

Por fim, agradeço a Universidade Federal Rural do Semi-Árido por todos estes anos dos quais sou aluno e ao mesmo tempo um filho desta instituição maravilhosa, sendo durante todo o percurso de cada um dos que pisam em solo ufersiano uma verdadeira mãe para todos nós discentes, docentes e técnicos.

RESUMO

O presente trabalho apresenta a importância do estudo, aplicabilidade e compreensão histórica da Teoria da Relatividade Restrita, bem como seu pouco enfoque em disciplinas teóricas e práticas de cursos de engenharia na UFERSA. Uma vez sendo uma área fundamental da Física Moderna, uma boa capacitação referente a Relatividade Restrita é primordial para uma formação de qualidade de todo e qualquer engenheiro que trabalhe direta ou indiretamente com desenvolvimento de tecnologias. Desta forma, é apresentado a descrição da Relatividade Restrita, sua aplicabilidade tanto tecnológica quanto didática, como também uma discussão sobre a baixa implantação de disciplinas que abordem tais conhecimentos em salas de aulas de engenharia na UFERSA.

Palavras-chave: Relatividade Restrita, Engenharia, Física Moderna, Tecnologias.

ABSTRACT

The present work presents the importance of the study, applicability and historical understanding of the Special Theory of Relativity, as well as its little focus on theoretical and practical disciplines of engineering courses at the UFERSA it is a fundamental area of Modern Physics, a good qualification regarding Special Relativity is essential for the quality education of any engineers who work directly or indirectly with technology development. In this way, a description of Restricted Relativity presents its applicability both technological and didactic, as well as a discussion about the low implementation of disciplines that address such knowledge in engineering classrooms at the UFERSA.

Keywords: Restricted Relativity, Engineering, Modern physics, Technologies.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	–	Referenciais Inerciais.....	04
Figura 2	–	Frente de Onda para Dois Observadores.....	05
Figura 3	–	Rede Imaginária de Relógios Sincronizados..	08
Figura 4	–	Simultaneidade de Eventos.....	09
Figura 5	–	Eventos 1 e 2 para o Observador no Trem.....	10
Figura 6	–	Eventos 1 e 2 para o Observador na Estação.....	10
Figura 7	–	Contração do Comprimento de uma Régua.....	13

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PRG	Princípio da Relatividade de Galileu
MRU	Movimento Retilíneo Uniforme
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
GPS	Sistema de Posicionamento Global
ISS	International Space Station
Ufersa	Universidade Federal Rural do Semi-Árido

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS.....	3
2.1	Objetivo Geral.....	3
2.2	Objetivos Específicos.....	3
3	PRINCÍPIO DA RELATIVIDADE RESTRITA.....	4
3.1	Transformadas de Galileu.....	4
3.2	Transformadas de Lorentz	6
3.3	Relatividade da Simultaneidade.....	8
3.4	Relatividade do Tempo.....	10
3.5	Relatividade do Comprimento	13
4	METODOLOGIA.....	15
5	CONTEXTO HISTÓRICO, TECNOLOGIAS E ENGENHARIAS.....	16
5.1	Sobre as Origens da Relatividade Restrita.....	16
5.2	Tecnologias e Relatividade Restrita.....	19
5.2.1	Relatividade Restrita e Setor Aeroespacial	19
5.2.2	Relatividade Restrita e Distâncias Cosmológicas.....	23
5.2.3	Relatividade Restrita e Quântica.....	24
5.3	Relatividade Restrita no Contexto da Engenharia.....	24
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	25
	REFERÊNCIAS.....	27

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da física clássica como ciência iniciou-se em meados dos séculos XVI e XVII, devido contribuições de inúmeros cientistas ao longo da história. Contudo, a solidez do que hoje se tem por mecânica clássica teve início a partir dos trabalhos de Galileu Galilei (FRANCO, 2003). A utilização do método científico por Galileu em seus trabalhos referentes a mecânica serve de pilar para que Issac Newton anos mais tarde descrevesse física e matematicamente todas as leis que regem a mecânica clássica até hoje imensamente utilizadas, o qual foi responsável por dar interpretações físicas sobre espaço e tempo que por muito tempo foram aceitas (LESCHE, 2005).

Dentre os fundamentais trabalhos de Newton, a aplicabilidade das suas leis entre referenciais inerciais, os quais foram propostos inicialmente por Galileu, regem o que, dentro do contexto da relatividade restrita de Albert Einstein, chama-se princípio da relatividade de Galileu (PRG).

Durante vários séculos, o PRG foi amplamente aceito por demonstrar matematicamente que as leis de Newton conservavam sua forma entre referenciais inerciais, o que, posteriormente, apresentou uma séria inconsistência com o advento do eletromagnetismo de James Clerk Maxwell (GAZZINELLI, 2019).

Diferentemente das leis da mecânica, a observação de fenômenos eletromagnéticos em diferentes referenciais, estando um deles se movendo com velocidade constante em relação ao outro, gerava inconformidades, principalmente relacionadas à velocidade da luz (LESCHE, 2005).

Com isso, no fim do século XIX, Hendrik Lorentz sugere uma série de transformações que fazem com que a teoria eletromagnética, seja invariante entre referenciais inerciais, servindo de apoio ao PRG para altas velocidades (COSTA, 1995).

Contudo, a premissa de Lorentz era fazer uso de um meio que servisse de referencial absoluto para a luz, o qual era chamado de éter. Em contrapartida, Albert Einstein acreditava que a luz e todos os demais fenômenos eletromagnéticos não necessitassem do éter como referencial absoluto e meio de propagação (PIATTELLA, 2020).

A partir dos trabalhos anteriores de Lorentz, Einstein foi capaz de descrever uma nova teoria da relatividade, embora que agora sem a necessidade de um éter, o qual não apresentava existência em diversos experimentos. Na nova relatividade de Einstein, espaço e tempo agora são um só, e não absolutos como pensava-se na mecânica clássica (RENN, 2005).

O avanço científico acontecido com o desenvolvimento da Relatividade Restrita no século XIX inaugurou um novo período que impactou não só na mudança do pensamento científico, mas também na visão do mundo tecnológico; uma vez que tal ruptura de conceitos fazia a física encontrar-se no estado da arte da mecânica (PERFOLL, et al. 2006).

Estando o planeta em constante evolução tecnológica, é perceptível a enorme importância da relatividade restrita em implementações tecnológicas do cotidiano, principalmente aquelas relacionadas a aplicabilidades que envolvem altas velocidades.

A dependência da sociedade moderna por ferramentas tecnológicas cada vez mais eficientes tornou-se algo cultural bem como uma fonte para o desenvolvimento social. Por trás do avanço tecnológico cada vez mais acentuado, está o papel da engenharia como formadora de profissionais capacitados (SOUZA, 2018).

Contudo, embora a relação entre a física moderna e tecnologias esteja intrinsicamente ligada aos cursos de engenharia, componentes curriculares referentes a estes tópicos de física estão presentes de forma muito discreta nas respectivas graduações por toda a Universidade Federal Rural do Semi-Árido (Ufersa).

Logo, é fato que com o desenvolvimento da física moderna, em especial à relatividade restrita, cursos de engenharia voltados a tecnologias necessitam de acompanhamento mais aprimorado a fim de que possam cada vez mais atualizarem-se com o andamento científico.

O presente trabalho propõe-se a mostrar a importância da relatividade restrita em diversas áreas do meio científico, passando desde seu desenvolvimento histórico como elo de transição entre a física clássica e moderna até sua fundamentação teórica como ciência. Nesse sentido, a primeira parte do trabalho está inserida no capítulo 3, o qual corresponde ao princípio da relatividade restrita, dado pelas concepções físicas e matemáticas de espaço e tempo de diversos cientistas ao longo da história. Por fim, o capítulo 5 aborda seu contexto de formação, implicações físicas e tecnológicas, bem como relação no âmbito de engenharia na UFERSA.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Destacar a importância do princípio da relatividade restrita desde seu contexto histórico de formação ao longo do desenvolvimento da física moderna, bem como seu destaque no cenário científico atual, inserida no âmbito dos cursos de graduação em engenharia da Universidade Federal Rural do Semi-Árido voltados para a área de tecnologias.

2.2 Objetivos Específicos

- Realizar revisão bibliográfica acerca dos princípios físicos e matemáticos da Relatividade Restrita, bem como sua relação com a física moderna;
- Desenvolver os aspectos de construção da Relatividade restrita ao longo da história da física, suas contribuições de diversos cientistas, bem como a relação de ruptura entre as premissas da mecânica newtoniana e o início de uma nova mecânica relativística;
- Destacar a importância da relatividade restrita no desenvolvimento da ciência e consequentemente de novas tecnologias das quais desfrutam dos princípios da mesma;
- Ressaltar a pouca abordagem de tais conhecimentos relativísticos nas salas de aula de graduações em engenharia da Ufersa, bem como destacar a necessidade de maior aplicabilidade.

3 PRINCÍPIO DA RELATIVIDADE RESTRITA

O princípio da Relatividade Restrita, também conhecida como Relatividade Especial, estabelece como primeiro postulado que todas as leis da física conservam suas formas entre referenciais inerciais, ou seja, referenciais os quais as leis da inércia de Newton são válidas. Seja um observador num referencial qualquer em repouso em relação a um outro observador num referencial que se move com velocidade constante, para ambos, os fenômenos físicos observados serão os mesmos (TIPLER, et al. 2000).

O segundo postulado da relatividade restrita, descrito pelo próprio Einstein, estabelece que a velocidade da luz é absoluta no vácuo para quaisquer referenciais inerciais, sendo a mesma dada como a velocidade limite no universo e independente da velocidade da fonte, não podendo nenhuma entidade física ultrapassar essa marca.

Uma premissa bastante importante no entendimento da Relatividade Restrita é a de experimentos imaginários. Assim como o próprio Albert Einstein a fez para elucidação de suas dúvidas, a explicação de diversos fenômenos passa por experimentos mentais (FRANCO, 2003).

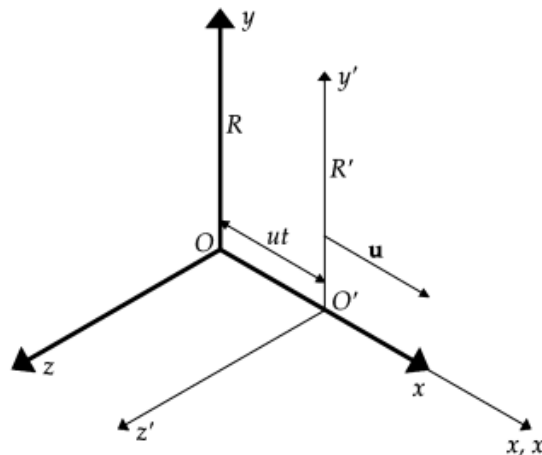
A ideia de relatividade descrita e muito bem teorizada por Einstein no início do século XX tem como bases tanto físicas quanto filosóficas a própria mecânica clássica, da qual Galileu Galilei foi o responsável por importantes desenvolvimentos séculos antes.

3.1 Transformadas de Galileu

Segundo Gazzinelli (2019), de maneira empírica, Galileu descreveu o que mais tarde seria conhecido por referencial inercial, sendo este caracterizado por um sistema de coordenadas onde forças externas não agem sobre o mesmo, e todo e qualquer referencial que move-se com velocidade constante em relação a este, também será inercial; o qual é dado como referência para quaisquer eventos. Logo, Galileu conseguiu demonstrar, ainda que por experimentos mentais, que a lei da inércia era válida entre referenciais inerciais.

Conforme exposto na Figura (1), sejam dois referenciais inerciais R e R' , estando R' movimentando-se com velocidade constante u em relação ao referencial R . Os dois referenciais coincidem suas origens no tempo $t = 0$ e um certo evento acontece um instante de tempo depois. Dois observadores situados um em cada referencial observarão as coordenadas do evento como sendo (x, y, z, t) para o observador em R e (x', y', z', t') para o observador em R' .

Figura 1: Referenciais Inerciais.



Fonte: (GAZZINELLI, 2019).

Da montagem do sistema de referenciais, é possível obter as relações de transformação tanto de posição quanto de velocidades. Para o observador situado em R' , as coordenadas do evento podem ser dadas facilmente,

$$x' = x - ut \quad (1)$$

$$y' = y \quad (2)$$

$$z' = z \quad (3)$$

$$t' = t. \quad (4)$$

Percebe-se uma importante diferença nas transformadas de Galileu em relação ao que se propõem a relatividade restrita: a noção de tempo. Para a física clássica, o tempo é o mesmo independente do referencial e não sofre nenhuma mudança em decorrência do movimento, o que se torna correto para velocidades muito abaixo da velocidade da luz, porém para velocidades relativísticas é um problema considerável (ANDRADE, 2017).

Com relação às transformações de velocidades entre referenciais inerciais, verifica-se a lei da inércia de Newton derivando-se a posição em cada referencial em relação ao tempo, uma vez que para um referencial inercial, qualquer outro que se move em movimento retilíneo uniforme (MRU) também será inercial.

$$\frac{dx'}{dt'} = \frac{dx}{dt} - u \quad (5)$$

$$\frac{dy'}{dt'} = \frac{dy}{dt} \quad (6)$$

$$\frac{dz'}{dt'} = \frac{dz}{dt} . \quad (7)$$

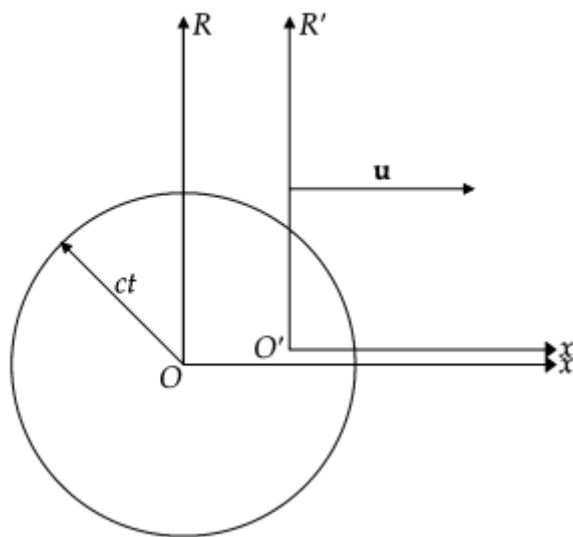
3.2 Transformadas de Lorentz

Conforme expõem Nussenzveig (2014), as transformadas de Lorentz foram propostas pelo físico neerlandês Hendrik A. Lorentz no final do século XIX e serviram de base para o desenvolvimento da relatividade de Einstein. A necessidade do uso das transformadas de Lorentz surgiram da imprecisão da análise de fenômenos eletromagnéticos vistos em distintos referenciais inerciais, mais precisamente, da variância das leis do eletromagnetismo perante as transformadas de Galileu.

Portanto, as transformadas de Lorentz são fundamentais no aspecto matemático da invariância de todos os fenômenos físicos entre referenciais inerciais, além do fato de que devem se reduzir às transformadas de Galileu para velocidades muito abaixo da velocidade da luz (SCHENBERG, 1988).

Sejam dois referenciais inerciais R e R' e dois observadores, um em cada referencial. O referencial R' move-se com velocidade constante u em relação à R conforme exposto na Figura (2) e ambos coincidem na origem para $t = t' = 0$. Um pulso luminoso é gerado na origem de R em $t = 0$ e propaga-se como uma onda esférica, sendo o raio do pulso dado como ct para o observador em R e ct' para o observador em R' . As equações (8) e (9) referem-se as frentes de onda para os observadores em R e R' , respectivamente.

Figura 2: Frente de onda para dois Observadores.



Fonte: (GAZZINELLI, 2019).

$$x^2 + y^2 + z^2 = (ct)^2 \quad (8)$$

$$x'^2 + y'^2 + z'^2 = (ct')^2. \quad (9)$$

A aplicabilidade direta das transformadas de Galileu descritas nas equações (1) a (4) na equação (9) para o referencial R' resulta numa inconformidade matemática e consequentemente uma variação na visualização do fenômeno, uma vez que,

$$x^2 - 2xut + (ut)^2 + y^2 + z^2 = (ct)^2. \quad (10)$$

Logo, conforme observa-se na equação (10), existe uma clara diferença entre as equações (8) e (10), o que corrobora com a invariância com relação às transformadas de Galileu (HALLIDAY, et al. 2009).

Conforme expõem Gazzinelli (2019), ambas as equações para a frente de onda entre os referenciais devem ser iguais, ou seja, que sejam invariantes. Por tentativa, escolhe-se uma transformação em que as coordenadas y e z não sofram modificações, uma vez que o movimento é ao longo do eixo x ; assim como deve ser linear para x e t , uma vez que a frente de onda se propaga em (MRU). Logo,

$$x' = x - ut \quad (11)$$

$$y' = y \quad (12)$$

$$z' = z \quad (13)$$

$$t' = t + kx, \quad (14)$$

onde k é uma constante qualquer que possa ser determinada. Fazendo uso das transformações das equações (11) a (14) e aplicando na equação (9), obtêm-se:

$$x^2 - 2xut + (ut)^2 + y^2 + z^2 = (ct)^2 + 2c^2ktx + (ckx)^2. \quad (15)$$

Fazendo $k = -u/c^2$ e realizando o rearranjo matemático, obtêm-se:

$$x^2 \left(1 - \frac{u^2}{c^2}\right) + y^2 + z^2 = (ct)^2 \left(1 - \frac{u^2}{c^2}\right). \quad (16)$$

Observa-se que a equação (16) é bem parecida com a equação (8), com a ressalva da presença do termo $(1 - u^2/c^2)$. Com isso, para que ambas as equações da frente de onda sejam iguais entre os referenciais com a utilização das transformadas de Galileu, as transformadas de Lorentz escolhidas são:

$$x' = \frac{x - ut}{\left(1 - \frac{u^2}{c^2}\right)} = \gamma(x - ut) \quad (17)$$

$$y' = y \quad (18)$$

$$z' = z \quad (19)$$

$$t' = \frac{t - \frac{u}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} = \gamma\left(t - \frac{u}{c^2}x\right). \quad (20)$$

O termo γ é chamado de constante de Lorentz, ou fator de Lorentz, e é dado como $1/\sqrt{1 - u^2/c^2}$. Logo, aplicando as transformadas de Lorentz das equações (17) a (20) na equação da frente de onda para o referencial R' , chega-se a equação inicial da frente de onda em R descrita na equação (8).

Embora bem fundamentadas matematicamente, apenas no início do século XX, Albert Einstein foi quem deu um significado físico às equações das transformações de Lorentz, o que posteriormente o consagrou com a relatividade restrita/especial (PIATTELLA, 2020).

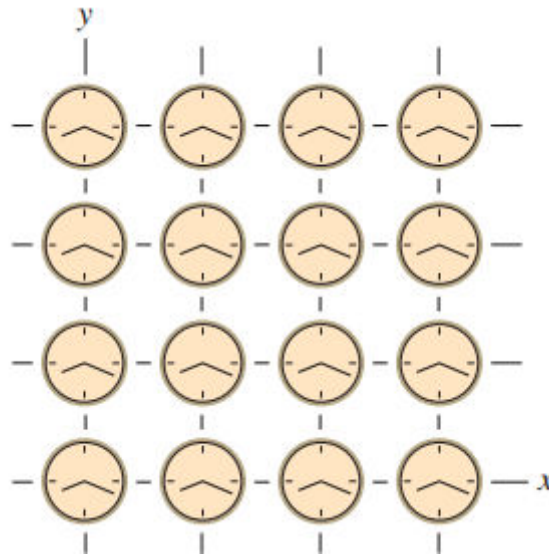
3.3 Relatividade da Simultaneidade

Para entendimento do princípio da relatividade restrita, deve-se observar o acontecimento de um ou mais eventos entre referenciais inerciais e suas relações com o espaço e o tempo. Cada evento pode ser determinado atribuindo-se coordenadas espaciais e temporais (YOUNG, et al. 2016).

Na prática, determinar as coordenadas temporais e espaciais de um evento é uma tarefa um tanto quanto difícil em função da posição do observador em relação ao acontecimento do evento no mesmo referencial inercial. Em situações mais complexas, a determinação do momento exato do acontecimento do evento pode ser inviável (HALLIDAY, et al. 2009).

Para se contornar essa problemática referente a posição do observador e o tempo exato do início do evento, uma alternativa bastante usual é construir uma rede imaginária de relógios sincronizados separados igualmente entre si, conforme a Figura (3):

Figura 3: Rede imaginária de relógios sincronizados



Fonte: (YOUNG, et al. 2016).

Como cada relógio está igualmente espaçado, as coordenadas espaciais de certo evento são fáceis de serem obtidas. Com relação ao deslocamento temporal, deve-se deixar os relógios sincronizados a fim de saber a origem no tempo (TIPLER, et al. 2000).

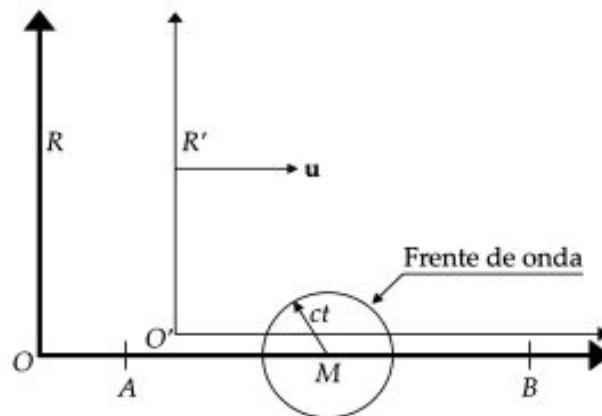
Segundo Halliday (2009), para uma exemplificação de sincronia, seja uma fonte que emite um pulso de luz em qualquer ponto escolhido como origem do sistema de relógios no tempo $t = 0$. Para um observador situado em qualquer um dos relógios, o momento em que o pulso chega no observador, este sincroniza o tempo no relógio dado por $t_1 = r/c$, sendo r a distância entre a fonte o observador e c a velocidade da luz.

O absolutismo do tempo e do espaço definidos por Newton no século XVII foi por muito tempo aceito e inquestionável até o início do desenvolvimento da Teoria da Relatividade, tanto pelos trabalhos iniciais de Lorentz, quanto pela consolidação da sua Teoria por Einstein (GAZZINELLI, 2019).

Contudo, a simultaneidade de um ou mais eventos depende do movimento relativo entre observadores em referenciais inerciais, ou seja, para um dos observadores um evento é dado como simultâneo, enquanto para outro não o será.

Sejam dois referenciais inerciais R e R' , um observador em R no ponto M e dois relógios colocados nos pontos A e B , equidistantes do observador situado no referencial R , conforme a Figura (4):

Figura 4: Simultaneidade de Eventos.



Fonte: (GAZZINELLI, 2019).

Seja um segundo observador no referencial R' que se move com velocidade constante u na direção do eixo x positivo em relação a R , que está em repouso. No instante $t = 0$ os observadores se encontram no ponto M enquanto o observador em R emite um pulso de luz que chega simultaneamente nos pontos A e B (GAZZINELLI, 2019).

Contudo, para o observador que se move com velocidade constante em R' , a frente de onda chegará primeiro no ponto B , uma vez que, devido ao movimento relativo, este verá o referencial R movendo-se para a esquerda. Nesse sentido, cada observador terá uma visão diferente com relação à simultaneidade dos eventos.

Vale salientar que para velocidades muito menores que a da luz, as discrepâncias com relação a simultaneidade de eventos são imperceptíveis, o que faz com que cotidianamente não sejam observados (LESCHE, 2005).

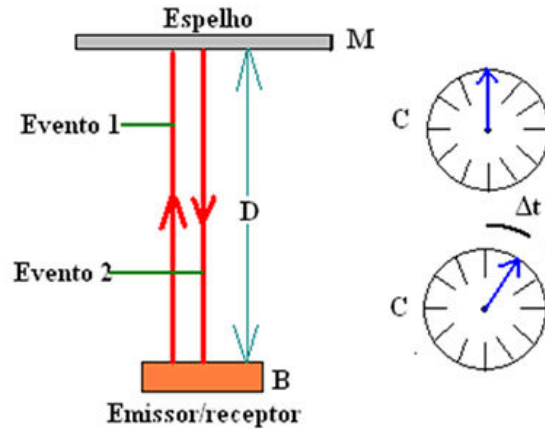
3.4 Relatividade do Tempo

Assim como na simultaneidade, a relatividade do tempo implica em diferentes observações temporais para observadores em referenciais inerciais, estando um referencial em movimento retilíneo uniforme em relação ao outro (HALLIDAY, et al. 2009).

Esteja um observador a bordo de um trem a velocidade constante v em relação a uma estação de trem. No trem junto com o observador há uma fonte luminosa, um espelho, um sensor de luz e um relógio. Um pulso de luz é incidido ao espelho a partir do ponto B , o qual o reflete (ponto M), fazendo o mesmo ser detectado pelo sensor novamente no ponto B , conforme

a Figura (5). A incidência do pulso e sua reflexão são dados como os eventos 1 e 2, respectivamente:

Figura 5: Eventos 1 e 2 para o observador no trem.



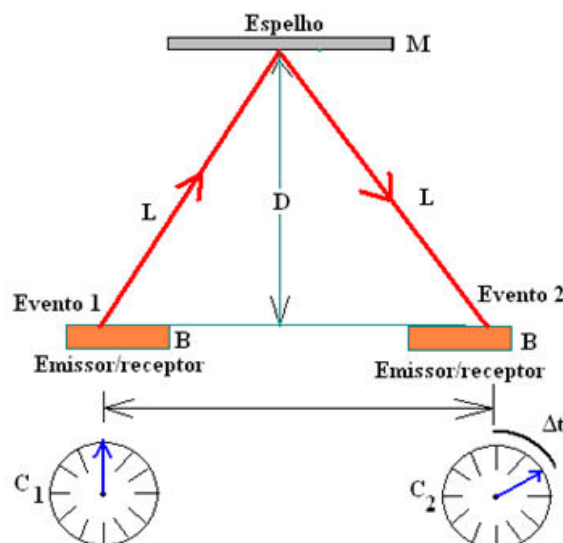
Fonte: (HALLIDAY, et al. 2009).

Seja D a distância entre os pontos B e M e c a velocidade do pulso de luz, o intervalo de tempo medido pelo observador no trem será:

$$\Delta t_0 = \frac{2D}{c}. \quad (21)$$

Uma vez que os dois eventos transcorrem espacialmente no mesmo ponto (B), apenas um relógio é necessário para medir o tempo. A observação dos mesmos eventos 1 e 2 não é a mesma para um observador na estação de trem, ou seja, em repouso em relação ao trem. Os dois eventos acontecerão em pontos distintos no referencial do mesmo devido o movimento do trem, e serão dados conforme a Figura (6) (YOUNG, et al. 2016).

Figura 6: Eventos 1 e 2 para um observador na estação.



Fonte: (HALLIDAY, et al. 2009).

Como os dois eventos não coincidem espacialmente para o observador na estação, faz-se necessário a utilização de dois relógios (c_1 e c_2) igualmente sincronizados, sendo um para cada evento, tanto partida do pulso (c_1) quanto sua reflexão (c_2).

De acordo com Halliday (2009), conforme o postulado da velocidade da luz de Einstein, a velocidade da luz deve ser a mesma para ambos os observadores. Contudo, para o observador na estação de trem a distância percorrida pela luz é $2L$, como observado na Figura (6), e o tempo medido entre os dois eventos é:

$$\Delta t = \frac{2L}{c}. \quad (22)$$

Nesse caso, a distância L , dada pela metade do percurso do pulso de luz, é obtida mediante o teorema de Pitágoras:

$$L = \sqrt{\left(\frac{v\Delta t}{2}\right)^2 + D^2}. \quad (23)$$

Realizando a combinação entre as equações (21) e (23), a distância L pode ser reescrita:

$$L = \sqrt{\left(\frac{v\Delta t}{2}\right)^2 + \left(\frac{c\Delta t_0}{2}\right)^2}. \quad (24)$$

Por fim, combinando as equações (22) e (24) e realizando o rearranjo matemático para explicitar Δt , obtém-se a relação entre intervalos de tempo para ambos os referenciais inerciais. Logo,

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}. \quad (25)$$

Percebe-se a partir da equação (25) que os intervalos de tempo medidos por ambos os observadores não serão os mesmos, uma vez que, a velocidade relativa entre referencias inerciais é capaz de gerar discrepâncias entre medidas temporais (COSTA, 1995).

Para o observador que se encontra parado no referencial da estação de trem (em repouso e relação ao trem), o tempo passará mais rapidamente. Já em contrapartida, para o observador no trem, o tempo passa de maneira mais lenta. Esse fenômeno é conhecido como dilatação temporal.

Vale salientar que para velocidades muito abaixo da velocidade da luz, a dilatação temporal tende a zero e os efeitos relativísticos no tempo são imperceptíveis. Conforme se observa no termo $(v/c)^2$, a medida que a velocidade se aproxima da velocidade da luz (c), os efeitos começam a aparecer. Inclusive, esse fator determinante da equação (25) é chamado parâmetro de velocidade e é definido pela letra grega β (CAMILO, 2016). Reescrevendo a equação (25) com o uso do fator de Lorentz, a dilatação temporal pode ser,

$$\Delta t = \gamma \Delta t_0. \quad (26)$$

Segundo Nussenzveig (2014), outra importante determinação da dilatação temporal é a ideia de tempo próprio, ou intervalo de tempo próprio, onde este intervalo de tempo será sempre o medido no mesmo ponto num referencial e será sempre menor que o medido em quaisquer outros referencias. No exemplo dos referencias do trem e da estação, o intervalo de tempo próprio é o verificado pelo observador no trem, uma vez que os dois eventos começaram e terminaram no mesmo ponto (B).

3.5 Relatividade do Comprimento

Assim como o tempo, o comprimento de corpos é afetado pelo referencial de sua medição. O movimento de um observador num referencial que se move com velocidade constante v , paralelo a um objeto, interfere diretamente na medição do mesmo se comparada com a medição feita por um observador num referencial que está em repouso em relação ao que está se movimentando.

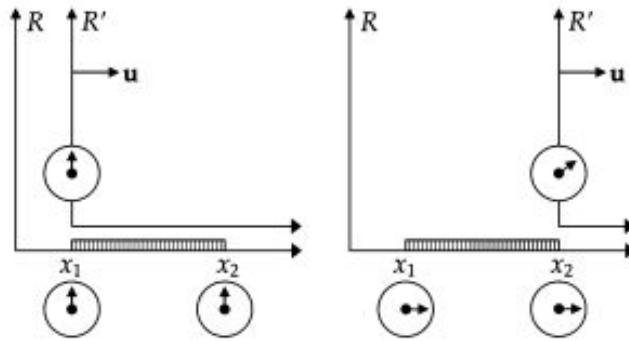
A única maneira de se contornar essa situação é medindo-se as duas extremidades do corpo ao mesmo tempo, uma vez que, caso a medição fosse realizada mediante a passagem de cada extremidade pelo observador em intervalos de tempo distintos, o comprimento sofreria contração, se comparada com a medição realizada por um observador em repouso (GAZZINELLI, 2019).

Esteja uma régua em repouso num referencial R junto com um observador. Esse observador medirá o comprimento da régua apenas subtraindo a posição mais a direita do eixo

x positivo menos a da esquerda, conforme a Figura (7). Nesse caso, o comprimento medido é chamado de comprimento próprio, uma vez que é medido no referencial onde a mesma está em repouso e é dado por:

$$L_0 = x_2 - x_1. \quad (27)$$

Figura 7: Contração do Comprimento de uma régua



Fonte: (GAZZINELLI, 2019).

Um referencial R' desloca-se com velocidade constante u em relação à R . Para um observador em R' , as extremidades da régua viajam com velocidade u no sentido negativo do eixo x e o tempo em que ambas passam pelo mesmo é dado por Δt_0 , sendo um tempo próprio. Logo, para o observador em R' o comprimento da régua será:

$$L = u\Delta t_0. \quad (28)$$

Contudo, o observador situado em R medirá um tempo Δt referente a passagem do referencial R' entre dois relógios previamente sincronizados situados nos pontos x_1 e x_2 e, da mesma forma, também medirá um comprimento próprio:

$$L_0 = u\Delta t. \quad (29)$$

Logo, reescrevendo a equação (28) na equação (29) e fazendo uso da dilatação temporal descrita na equação (26), a relação de comprimentos medidos será:

$$L = \frac{L_0}{\gamma}. \quad (30)$$

Para Costa (1995), com valores de $\gamma > 1$ é notável uma contração do comprimento de corpos na direção de propagação do referencial. Muitas vezes é um tanto quanto difícil entender que um corpo pode ter sua dimensão contraída, porém, isto é um efeito real e corrobora com o fato de o espaço e o tempo serem relativos e não absolutos como na mecânica newtoniana.

Vale salientar que para a Teoria da Relatividade Restrita, suas premissas são válidas para campos de gravitação de intensidade nula, o que fora mais tarde complementado com o advento da Relatividade Geral, na qual Einstein dá uma complementação às premissas encontradas na relatividade especial, unindo o espaço-tempo a gravitação. Em sua complementação, a Relatividade Geral dá uma nova interpretação ao que se entende por força gravitacional, a qual perde seu caráter de força que age a distância instantaneamente e torna-se uma estrutura atrelada ao espaço-tempo em torno de um ponto material (COSTA, 1995).

4. METODOLOGIA

A metodologia de pesquisa do trabalho consistiu em pesquisas bibliográficas em caráter de revisão acadêmica, realizadas com o auxílio de livros didáticos, tanto físicos quanto digitais, Trabalhos de conclusão de Curso (TCCs), bem como em artigos científicos publicados em revistas.

A primeira fase do trabalho consistiu na construção teórica da Relatividade Especial, englobando suas características físicas e matemáticas. Nessa fase, foram utilizados como embasamentos para a realização principalmente livros didáticos dos quais abordam o tema, dentre eles Tipler, et al (2000), Halliday et al (2009), Nussenzveig (2014), Young et al (2016), Costa (1995), Gazzinelli (2019), Lesche (2005) e Schenberg (1988). Da mesma forma, foram utilizados TCCs para a realização da pesquisa nesta fase, descritos por Andrade (2017), Franco (2003), Piattella (2020) e Camilo (2016).

A segunda etapa da pesquisa de revisão contou com a elaboração da construção histórica da Relatividade Restrita, desde as transformadas de Galileu até a formulação final por Einstein no início do século XX, a qual foi baseada em artigos de revistas descritos por Renn (2005), Mariconda (2006) e Martins (2005); livros didáticos que contemplam também um arcabouço histórico, dados por Tipler, et al (2000), Gazzinelli (2019), Lesche (2005) e Costa (1995), assim como o TCC referente a Franco (2003).

A terceira fase da revisão bibliográfica deu-se com relação ao enfoque da Relatividade Especial no desenvolvimento científico e de tecnologias, sobre a qual foram utilizados TCCs com foco no desenvolvimento tecnológico, dados com relação a princípios relativísticos, os

quais foram Moura (2010) e Correia et al (2017). De forma complementar, foi feito uso de Tipler (2000) para exemplificações de desenvolvimentos científicos. Por último, a etapa final da divisão do trabalho deu-se sobre o estudo da relação da Relatividade Restrita com os cursos de engenharia na Ufersa.

Finalmente, de cada uma das referências utilizadas foram realizados resumos e fichamentos que serviram de suporte para o desenvolvimento do texto como um todo, unindo cada uma das ideias de cada trabalho na coesão encontrada no trabalho.

5. CONTEXTO HISTÓRICO, TECNOLOGIAS E ENGENHARIAS

5.1 Sobre as Origens da Relatividade Restrita

Responsável por estudar o movimento dos corpos e suas causas, a mecânica é, sem sombra de dúvidas, uma área da física que levanta questionamentos e gera curiosidades desde os primórdios da ciência. Dentre os diversos cientistas que contribuíram para o desenvolvimento da mecânica ao longo da história, Galileu Galilei destaca-se por ser um elo de transição entre a física medieval e a moderna, sendo um importante responsável no estudo do movimento dos corpos celestes, onde defendia fortemente que a terra se movia ao redor do sol, e não o contrário, como se pensava à época (FRANCO, 2003).

Sem dúvidas, Galileu está diretamente ligado à revolução científica acontecida no século XVII, da qual resultou em mudanças estruturais significativas para a ciência mundial, em especial à física clássica, a partir do desenvolvimento do método científico baseado na observação e experimentação. Da mesma forma, foi um precursor de Einstein como formulador de experimentos mentais para a resolução de problemas físicos, dentre os quais, foi o primeiro a relacionar empiricamente que as leis da mecânica eram válidas em diferentes referenciais inerciais (MARICONDA, et al. 2006).

A partir de uma mecânica com premissas bem estabelecidas por Galileu, Isaac Newton foi capaz de fomentar as três leis fundamentais que regem a física clássica em meados do século XVIII, a qual estabeleceu os princípios de tempo e espaço que seriam aceitos por séculos posteriores (LESCHE, 2005).

A primeira lei estabelece que partículas que se encontram em repouso ou MRU tendem a permanecer em seu estado inicial desde que forças externas não atuem sobre o sistema. A segunda lei implica que a força que atua sobre uma partícula será igual a variação do momento no tempo, sendo o momento definido como a quantidade de movimento de uma partícula de

massa constante, o qual é dado como o produto da massa por sua velocidade. Por último, se uma partícula *A* exerce força sobre uma partícula *B*, então esta última exercerá sobre *A* uma força de mesma intensidade e sentido contrário.

A implicação física das três leis fundamentais da mecânica clássica dadas por Newton pressupõe que tanto espaço quanto o tempo são absolutos. A definição de absolutismo espacial significa dizer que não há qualquer dependência em relação ao observador, ou seja, o espaço será sempre dado como referencial absoluto para qualquer observação. Da mesma forma, as premissas espaciais newtonianas consistiam em homogeneidade, isotropia e euclidianismo, ou seja, similaridade e mesmas propriedades em quaisquer direções, assim como a reta seria a menor distância entre dois pontos (MARTINS, 2005).

A noção de absolutismo temporal proposta por Newton induz a utilizar o tempo como entidade independente de qualquer relação com o meio externo a ele. Assim como para o espaço, o tempo independe das relações com observadores e deve ser homogêneo em qualquer ponto do próprio espaço, fluindo uniformemente do passado para o futuro, o que só fora questionado mais tarde com a noção de tempo para a mecânica quântica.

Durante mais de duzentos anos, as concepções newtonianas de tempo e espaço serviram de base tanto para a confirmação da invariância das leis fundamentais da mecânica entre referenciais inerciais, quanto para a própria definição física de espaço e tempo aplicadas às próprias leis. Por exemplo, a primeira lei, também chamada de lei da inércia, trata da definição do que seriam referenciais inerciais. Para a segunda lei, considerar que o espaço é homogêneo, é o mesmo que dizer que a massa não depende da orientação da aceleração, sendo, neste caso, uma grandeza escalar. Para a terceira, caso a ação das forças seja a distância, neste caso haverá a implicação do absolutismo temporal (GAZZINELLI, 2019).

Contudo, segundo Franco (2003), uma ruptura tanto física quanto filosófica dos pensamentos de Newton surgiu com o desenvolvimento do eletromagnetismo de James Clerk Maxwell, no século XIX. Com o advento da Teoria Eletromagnética, algumas inconsistências físicas começaram a aparecer quanto a observação de determinados eventos vistos por distintos observadores em referenciais inerciais também distintos.

Diferentemente das leis fundamentais da Mecânica Clássica, fenômenos eletromagnéticos surgiam como tanto variantes quanto assimétricos entre referenciais inerciais, ou seja, as teorias de Maxwell aplicadas às transformadas de Galileu eram incompatíveis.

Entre os trabalhos de Maxwell, a determinação da luz como um fenômeno eletromagnético foi uma das principais descobertas da física para aquela época, agrupando a ótica dentro do eletromagnetismo (COSTA, 1995). Dessa forma, surgiam aí duas frentes de

questionamentos: a luz, como um fenômeno eletromagnético, não apresentava coerência vista a partir das transformadas de Galileu, sendo assim, sobre qual referencial deveria-se medir sua velocidade c ? A outra pergunta refere-se ao fato de a luz ser uma onda, sendo assim, qual seria seu meio de propagação?

Até então, o pensamento vigente para todos os tipos de ondas era o mesmo que para as ondas mecânicas, ou seja, deveria existir um meio de propagação. Nesse sentido, surge aí um meio que dava respostas satisfatórias até então, sendo ele chamado de éter. Esse éter apresentava características muito importantes que serviam para responder os questionamentos e debates até então, sendo que o mesmo deveria ser um referencial absoluto para a luz e quaisquer outros fenômenos eletromagnéticos, o que fazia do eletromagnetismo ser invariante perante as transformadas de Galileu, assim como serviria de meio material para a propagação da luz (LESCHE, 2005).

A premissa de repouso absoluto para o éter implica dizer que para uma medição da velocidade da luz em qualquer ponto da terra, deveria-se obter distintos valores, sendo um para a propagação na mesma direção de translação e outra para a propagação contrária ao respectivo movimento terrestre. Ou seja, a obtenção da velocidade absoluta da luz implicaria em somar ou subtrair do valor obtido a velocidade translacional do planeta. Qualquer resultado diferente indicaria o arrastamento do éter pelo movimento da Terra (GAZZINELLI, 2019).

Conforme Tipler (2000), na tentativa de determinar a velocidade absoluta da luz, Albert Michelson e Edward Morley no século XIX, realizaram experiências com o uso de espelhos refletivos e semiprateados, como também com sensores espectrômetros, a fim de determinar padrões de interferência de caminhos ópticos distintos. Contudo, os resultados encontrados mostraram que não seria possível obter a velocidade absoluta da luz em relação ao éter, ou seja, seja a velocidade orbital da terra no mesmo sentido ou em sentido contrário à luz, a velocidade da luz apresentava-se a mesma.

O resultado não satisfatório obtido via experimentos de Michelson e Morley consistiu num forte baque para a física clássica até então, uma vez que seria até mesmo embaraçoso descrever o comportamento cinemático para a luz sem que a sua velocidade não dependa das velocidades de translação da Terra. Uma possível solução seria o arrastamento do éter em função do movimento orbital, o que poderia explicar os resultados anteriormente obtidos.

Contudo, manter o éter arrastado pelo movimento translacional e consequentemente em repouso e no mesmo referencial da Terra, contradizia o fenômeno da aberração da luz descoberto por James Bradley em 1725. Bradley, ao examinar a variação da posição de estrelas, percebeu que seria necessário inclinar o telescópio num ângulo de aproximadamente 20° em

virtude da composição de velocidades da luz e do planeta, porém o fato de inclinar o telescópio para observação mostra que o éter não é arrastado, uma vez que se o fosse, a inclinação do telescópio deveria ser nula (RENN, 2005).

Todavia, embora a teoria da presença do éter como referencial absoluto e meio de propagação para todos os fenômenos eletromagnéticos apresentasse falhas conceituais demasiadamente importantes, já em 1904 Lorentz apresentou ao mundo científico uma série de transformadas matemáticas que faziam do eletromagnetismo ser invariante entre referenciais inerciais. Dessa forma, as Transformadas de Lorentz englobavam toda a física dentro do Princípio da Relatividade de Galileu.

Dentre as suas teorias, para explicar a não obtenção da velocidade absoluta da luz, Lorentz teorizou uma contração no comprimento dos corpos em sua direção de propagação, o que, encurtaria o braço de um espectrômetro utilizado na experiência de Michelson e Morley o suficiente para explicar os resultados insatisfatórios obtidos para o éter (COSTA, 1995).

Conforme Renn (2005), as interpretações físicas propostas por Lorentz embora matematicamente robustas não satisfaziam as concepções do próprio Einstein, uma vez que as transformadas de Lorentz serviam como complemento às transformações de Galileu, ou seja, fazendo uso de princípios absolutistas de tempo e espaço defendidos por Newton e aceitos pela comunidade científica. Da mesma forma, Lorentz seguia com o uso do éter como referencial absoluto e meio de propagação de fenômenos eletromagnéticos.

Nesse sentido, Einstein se viu motivado a fazer uso de uma mecânica Newtoniana corrigida, a qual não procurava no éter o referencial absoluto segundo os preceitos de Lorentz, muito pelo contrário. Suas premissas sobre a mecânica resultaram numa relatividade entre espaço e tempo, sendo o absolutismo referente à velocidade da luz, a qual é independente do movimento da fonte. Tempo e espaço agora são uma só entidade física, o que gerou uma enorme ruptura às ideias aceitas por séculos de mecânica newtoniana (FRANCO, 2003).

5.2 Tecnologias e Relatividade Restrita

Sendo uma área da física moderna, a relatividade restrita destaca-se como alicerce para o desenvolvimento de tecnologias contemporâneas desde sua fundamentação, mesmo que ainda não tenha ferramentas mais completas se comparada à relatividade Geral. Dentre suas contribuições, todo e qualquer meio tecnológico que empreenda velocidades muito grandes, requerem uma atenção especial.

5.2.1 Relatividade Restrita e o Setor Aeroespacial

O setor aeroespacial demanda total capacitação em função da relatividade restrita, uma vez que tecnologias com velocidades exorbitantemente altas são bastante comuns. Controlar uma aeronave ou um satélite de uma base terrestre requer que a todo momento correções relativísticas sejam feitas a fim de um correto uso (MOURA, 2010).

O Sistema de Posicionamento Global (GPS) é uma tecnologia bastante importante nos dias de hoje, tanto para localização civil quanto militar. O GPS foi desenvolvido pelo departamento de defesa dos Estados Unidos para uso unicamente militar, sendo apenas posteriormente aplicado civilmente.

O sistema GPS é composto por 24 satélites, compreendidos cada um com relógios atômicos que enviam sinais sincronizados entre satélite e receptor com informações de tempo e posição, sendo que, para que seja possível obter um sinal sincronizado, o receptor deve estar recebendo sinais de pelo menos 4 satélites. Os satélites de GPS percorrem a órbita terrestre divididos em seis planos orbitais, sendo quatro satélites por cada plano a uma inclinação de 55° com a linha do equador. Tal configuração faz com que existam pelo menos quatro satélites visíveis de qualquer ponto do planeta a qualquer momento.

O período orbital de cada satélite na órbita terrestre é de aproximadamente 12 horas (ou 43080''), sendo que a todo momento os efeitos relativísticos são bastante influenciáveis devido as elevadas velocidades, o que requer boa correção. Com relação a determinação da dilatação temporal num satélite, esta dependerá da determinação da sua velocidade orbital, a qual estará em função da distância dos centros de gravidade do planeta e do próprio satélite, que por sua vez é dado de acordo com o período orbital.

Em posse do período orbital, fazendo uso da terceira lei de Kepler, ou lei dos períodos, é possível encontrar a distância entre os centros de gravidade, sendo P_s , G , M_t , M_s e a o período orbital, constante de gravitação, massa da terra, massa do satélite e distância entre os centros de gravidade, respectivamente:

$$a = \left(\frac{P_s^2 G (M_t + M_s)}{4\pi^2} \right)^{1/3}. \quad (31)$$

Como $M_s \ll M_t$ e sendo $M_t \cong 5,98 \times 10^{24} \text{ kg}$, $G \cong 6,67 \times 10^{-11} \frac{\text{Nm}^2}{\text{kg}^2}$ e $P_s = 43080 \text{ s}$, resulta:

$$a = \left(\frac{P_s^2 G M_t}{4\pi^2} \right)^{1/3} = 26566818,99 \text{ m} . \quad (32)$$

Em posse da distância entre os centros de gravidade, da constante de gravitação e da massa da terra, obtém-se a velocidade orbital do satélite em relação à terra:

$$V_{circs} = \sqrt{\frac{G M_t}{a}} = 3874,75 \text{ m/s} . \quad (33)$$

Por fim, considerando t_2 período de 1 ano (ou 31536000 s) de percurso de um satélite na órbita terrestre e sendo t_1 o tempo para um observador na terra, o valor medido no referencial da terra será dado por:

$$t_1 = \frac{t_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{V_{circs}}{c} \right)^2}} = 31536000,002634 \text{ s} . \quad (34)$$

Logo, subtraindo t_2 de t_1 , percebe-se que em virtude dos efeitos temporais relativísticos, para um observador na terra em repouso junto a mesma, o tempo medido será 2,634 ms a mais do que para o próprio satélite.

Como o tempo e o espaço são relativos e dependem do referencial do observador, dilatações espaciais são especialmente importantes quanto à correção de erros, uma vez que a determinação correta da trajetória é fundamental para o sistema GPS (CORREIA, et al. 2017). Nesse sentido, para o mesmo satélite dado no exemplo anterior, a distância percorrida pelo satélite para um observador no referencial da terra será:

$$S_2 = V_{circs} t_2 = 122194128269,113 \text{ m} . \quad (35)$$

Já para a distância dada no referencial do satélite, a mesma será de:

$$S_1 = S_2 \left[\sqrt{1 - \left(\frac{V_{circs}}{c} \right)^2} \right] = 122194128258,907 \text{ m} . \quad (36)$$

Portanto, subtraindo a distância própria (S_2) da obtida via referencial do satélite (S_1), ou seja, $S_2 - S_1$, resultará numa contração de 10,206 m.

Logo, embora sejam efeitos baixos se comparados para um período de um ano, para aplicações que demandam grande precisão como os sistemas GPS, a não correção dos efeitos relativísticos gerariam prejuízos para todo o planeta ao ponto de entrarem em desuso. Vale salientar também que os principais efeitos relativísticos sofridos não só pelo sistema GPS, mas como também todo e qualquer empreendimento aeroespacial advém do campo gravitacional do planeta, o qual contribui em maior parte para os desvios espaço-temporais (CORREIA, et al. 2017).

Assim como para os satélites de GPS, o controle da Estação Espacial Internacional (ISS) requer sinais sincronizados entre estação e torre na Terra, assim como correções espaciais devem recorrentemente serem feitas afim de se ter conhecimento da localização em tempo real da mesma (MOURA, 2010).

Nesse sentido, sendo o período orbital da estação espacial (P_e) de aproximadamente 5479,8 s (1,5 horas) e fazendo uso dos mesmos dados de Massa da terra e constante gravitacional da equação (32), a distância entre os centros de gravidade da Terra e da estação é:

$$a_e = \left(\frac{P_e^2 G M_t}{4\pi^2} \right)^{1/3} = 6719426,880899 \text{ m} . \quad (37)$$

A velocidade orbital será dada por:

$$V_{circE} = \sqrt{\frac{G M_t}{a_e}} = 7704,55 \text{ m/s} . \quad (38)$$

Assim como para o sistema GPS, considerando um período de um ano de órbita da ISS ao redor do planeta terra, ou seja, sendo $t_4 = t_2 = 31536000$ s o tempo de percurso da estação, o tempo medido no referencial da terra será:

$$t_3 = \frac{t_4}{\sqrt{1 - \left(\frac{V_{circE}}{c} \right)^2}} = 31536000,010414 \text{ s} , \quad (39)$$

o que resulta numa defasagem de $10,414 \text{ ms}$ entre as medições em diferentes referenciais. Já os deslocamentos vistos no referencial da terra e da ISS são S_3 e S_4 , respectivamente:

$$S_4 = V_{circE} t_4 = 242970753029,502 \text{ m} \quad (40)$$

$$S_3 = S_4 \left[\sqrt{1 - \left(\frac{V_{circE}}{c} \right)^2} \right] = 242970752949,264 \text{ m} . \quad (41)$$

Logo, a distância própria dada para um observador na terra (S_4) subtraída pela medida de acordo com o referencial da ISS (S_3), ou seja, $S_4 - S_3$, mostra uma contração de $80,238 \text{ m}$ na direção de propagação do satélite. Assim como a própria ISS, os astronautas que estão inseridos dentro da mesma sofrerão os efeitos relativísticos descritos anteriormente para tempo e espaço.

Vale salientar que a utilização das grandezas por extenso, e não por notação científica, deu-se em função da necessidade da visualização das diferenças observacionais para cada um dos referenciais, ou seja, das deformações causadas pelas altíssimas velocidades.

5.2.2 Relatividade Restrita e Distâncias Cosmológicas

Quando se fala em medições cosmológicas, a comparação com unidades de medidas comumente utilizadas é geralmente impraticável, principalmente relacionadas a comprimentos. Devido a distância entre galáxias, estrelas e planetas ser absurdamente grande, utiliza-se a medida conhecida como ano-luz, sendo que um ano-luz equivale a aproximadamente $9,461 \times 10^{12} \text{ km}$.

Um erro bastante comum utilizado em experimentos mentais relacionados a distâncias em anos-luz é confundir comprimentos entre referenciais, ou seja, a distância entre observador e certo astro não é a mesma entre astro e algo que pudesse viajar a uma velocidade muito próxima a da luz.

Seja a estrela Próxima Centauri, a segunda mais próxima da Terra, a qual se encontra a $4,2$ anos-luz de distância. Essa distância significa dizer que no referencial do planeta, a luz da estrela leva $4,2$ anos para chegar. Contudo, fazendo uso de experiências mentais, caso existisse uma nave que viajasse muito próximo a c , o tempo de viagem seria bem menor. Esteja essa nave viajando a $99,99\%$ de c , o tempo de viagem em seu referencial seria dado conforme a equação (26). Logo,

$$4,2 = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{0,9999c}{c}\right)^2}} \cong 0,06 \text{ anos.} \quad (42)$$

Portanto, para um observador na nave, levaria apenas aproximadamente 0,06 anos ou 21 dias, 21 horas e 36 minutos para chegar à Próxima Centauri.

Uma consequência da relatividade do tempo é um paradoxo aparente conhecido como paradoxo dos gêmeos, ou seja, sejam dois irmãos gêmeos A e B, ambos com 20 anos de idade. O gêmeo B viajará para um planeta X numa nave que pode alcançar 86,6% da velocidade da luz, e o seu irmão A sabe que a viagem durará 20 anos para seu referencial na terra, sendo 10 de ida e 10 de volta nesta espaçonave. Logo, para B, conforme a dilatação do tempo, sua viagem durará o seguinte tempo:

$$\Delta t_{0B} = 20 \left(\sqrt{1 - \left(\frac{0,866c}{c}\right)^2} \right) = 10 \text{ anos.} \quad (43)$$

Portanto, na percepção temporal de B a viagem durará 10 anos, enquanto A espera que quando B retornar, este esteja 10 anos mais jovem. Contudo, tomando o referencial de B, o mesmo estará em repouso e verá a terra afastando-se a 86,66% da velocidade da luz e tenderá a imaginar que seu irmão A envelhecerá apenas 5 anos, uma vez que:

$$\Delta t_{0A} = 10 \left(\sqrt{1 - \left(\frac{0,866c}{c}\right)^2} \right) = 5 \text{ anos.} \quad (44)$$

Logo, cada irmão terá explicações distintas. Para A, seu irmão terá 30 anos enquanto ele terá 40. Já para B, seu irmão terá 25 e o mesmo 30 anos. Sendo assim, qual visualização estará correta? A resposta é a interpretação de A, uma vez que durante a viagem de B na espaçonave, a mesma acelerará e desacelerará em alguns momentos, o que faz com que seu referencial não seja mais inercial, considerando que o referencial de A (terra) é aproximadamente inercial.

5.2.3 Relatividade Restrita e Quântica

A relatividade restrita está diretamente ligada à quântica quanto a observação e determinação de eventos. Como exemplo, sejam *múons*, partículas elementares instáveis de mesma carga dos elétrons, porém 207 vezes maior massa, os quais podem ser criados via colisões de átomos com radiação cósmica nas camadas mais externas da atmosfera (TIPLER, et al. 2000).

Em ensaios de laboratório, *múons* com baixa velocidade de movimento apresentam tempo próprio de meia vida de $\Delta_{tm} = 2,2 \mu s$, sendo o tempo de meia vida caracterizado como medida temporal em que a metade dos *múons* transformam-se em outras partículas (decaimento). Neste caso, considerando que um *múon* viaja muito próximo a velocidade da luz, antes de decair, o mesmo percorre uma distância em direção a superfície da terra dada por:

$$\Delta_{sm} \cong c\Delta_{tm} \cong 659,543 m, \quad (45)$$

o que faz com que a partícula não consiga chegar à superfície terrestre. Contudo, alguns experimentos mostram que uma grande quantidade de *múons* conseguem chegar à superfície da terra, o que é explicado devido a relatividade do tempo para um observador no planeta.

Sendo assim, considerando que um *múon* viaja a 99% da velocidade da luz no referencial da terra, o mesmo percorrerá uma distância dada conforme a equação (26), logo:

$$\Delta_{tmT} = \gamma\Delta_{tm} = 15,6 \mu s. \quad (46)$$

Dessa forma, para um observador no referencial terrestre, o deslocamento da partícula de *múon* antes do decaimento será de:

$$\Delta_{smT} = (0,99c)(\Delta_{tmT}) \cong 4628,625 m. \quad (47)$$

5.3 Relatividade Restrita no Contexto da Engenharia

A dependência global no advento de tecnologias cada vez mais completas, complexas e que, em suma, sirvam ao bem estar da sociedade é um fato inegável e, por trás de tais transformações recorrentes, está o papel da engenharia como fonte geradora, capacitante e transformadora de tais recursos. Além do mais, dentro do desenvolvimento constante de

ferramentas tecnológicas aparece a física como entidade desenvolvimentista paralela a engenharia, da qual gera os frutos teóricos dos quais a engenharia utiliza para serem aplicados.

É fato que o desenvolvimento da Física Moderna desde o fim do século XIX tem implicado no melhoramento de tecnologias que estejam diretamente em função dos princípios que regem as suas diversas áreas, o que não é diferente para a Relatividade Restrita. Sendo assim, é mais do que nítido que para que seja possível continuar a evolução tecnológica enfrentada pela humanidade desde seus primórdios, é necessário constante evolução científica com relação a Relatividade Especial.

Nesse sentido, as engenharias como servidoras de conhecimento técnico, prático e acadêmico são fundamentais para o avanço da ciência e tecnologia em todo o mundo. Logo, a presença de disciplinas teóricas que abordem os conhecimentos sobre os princípios da Relatividade Restrita é fundamentalmente importante quanto ao desenvolvimento profissional de um engenheiro tanto a nível de mercado quanto a nível de docência, a fim de que estejam sempre capacitados a acompanhar as tecnologias que corriqueiramente surgem.

Contudo, observa-se na Ufersa uma total deficiência de implantação e implementação de ferramentas de ensino que abordem a Relatividade Restrita da forma tão importante quanto deveria ser, fazendo com que o profissional engenheiro busque estratégias de capacitação externas à grade curricular que o façam aprimorar tais conhecimentos para um mercado de trabalho que deseja formações cada vez mais completas.

Com uma crescente demanda tanto no setor aeroespacial, o qual é um importante exemplo da utilização da Relatividade Restrita, quanto em áreas como quântica e telecomunicações, as graduações em engenharia da Ufersa cujas grades curriculares são inteiramente ligadas a tecnologias que funcionam em função de princípios relativísticos, necessitam mais e mais aprimoramento de metodologias de abordagem da relatividade especial, motivo este pelo qual advoga-se uma melhoria significativa não só em relatividade restrita, mas ampliando um pouco mais, é fundamental um real desenvolvimento em disciplinas de física moderna.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Relatividade Restrita foi descrita no trabalho em quatro principais etapas, sendo a primeira com relação a apresentação de sua teorização física e matemática, o que, posteriormente, fez-se abordar no seu desenvolvimento histórico, fundamental no entendimento da evolução física para a época. Em vista de tais abordagens, exemplificou-se sua importância

para a construção da ciência, em especial a física moderna, e o consequente crescimento de inovações tecnológicas. Por fim, é destacado o pouco enfoque em disciplinas que abordam tais conhecimentos fundamentais em salas de aula de cursos de engenharia na Ufersa.

Com a utilização de metodologias de pesquisas bibliográficas acerca não só da relatividade especial em si, como também suas implicações e consequências em outras diversas áreas do desenvolvimento científico, tornou-se perceptível a partir de sua construção histórica, reconhecer a impactante ruptura com concepções tanto físicas quanto filosóficas impostas por séculos mediante contribuições de diversos cientistas, em especial Galileu e Newton, o que reflete na importância do conhecimento histórico do desenvolvimento da ciência como formadora de um melhor processo de ensino-aprendizagem.

Nesse sentido, é impossível não reconhecer o papel da relatividade como fonte de desenvolvimento da ciência desde seus primeiros questionamentos e hipóteses, o que gera uma fonte fundamental quanto ao aparecimento de novas e mais sofisticadas tecnologias que tendam a renovar cada vez mais o modo de vida da humanidade. Além disso, o entendimento dos efeitos relativísticos, dentro da perspectiva tecnológica, faz com que o ser humano possa também elaborar maneiras de fazer com que esses efeitos possam ser amenizados ou corrigidos para determinadas situações.

Embora seja notória a expressividade da Relatividade Especial dentro do que se tem conhecimento como Física Moderna, a abordagem de seus conceitos em salas de aula de graduação em engenharia na Ufersa é algo preocupante, uma vez sendo a engenharia fonte formadora de profissionais capacitados a projetar e desenvolver empreendimentos tecnológicos, ou seja, cientistas responsáveis por correlacionar teoria e prática para área tão fundamental e fascinante.

REFERÊNCIAS

- [1] FRANCO, MARCO PAULO VIANNA. DEN SCHRITT: As Implicações Filosóficas da Teoria da Relatividade. 2003.
- [2] LESCHE, Bernhard. **Teoria da relatividade**. Editora Livraria da Física, 2005.
- [3] GAZZINELLI, Ramayana. **Teoria da relatividade especial**. Editora Blucher, 2019.
- [4]: COSTA, Manoel Amoroso. **Introdução à teoria da relatividade**. Ed. Ufrj, 1995.
- [5] PIATTELLA, Oliver Fabio. O artigo fundador da teoria da relatividade restrita: Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento. **Cadernos de Astronomia**, v. 1, n. 1, p. 157-176, 2020.
- [6] PERFOLL, Aline Pâmela; REZENDE JR, M. F. A Física Moderna e Contemporânea e o ensino de Engenharia: Contexto e Perspectivas. In: **Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia, Passo Fundo**. 2006.
- [7] SOUZA, Ana Paula Grimes; CUSTÓDIO, José Francisco; REZENDE JR, Mikael Frank. A Física Moderna e Contemporânea na formação de engenheiros: a análise das estruturas curriculares de duas instituições. **Revista ENCITEC**, v. 8, n. 3, p. 97-111, 2018.
- [8] TIPLER, Paul Allen; MOSCA, Gene. **Física para cientistas e engenheiros. Vol. 3: física moderna: mecânica quântica, relatividade ea estrutura da matéria** . Grupo Gen-LTC, 2000.
- [9] ANDRADE, João Luís Brandão. Algumas aplicações da relatividade restrita. 2017.
- [10] SCHENBERG, Mário; HAMBURGER, Amália Império; GOLDFARB, José Luiz. **Pensando a física**. Nova Stella, 1988.
- [11] HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. Fundamentos de física, volume 4: Óptica e física moderna. **Tradução e revisão Ronaldo Sergio de Biasi, Rio de Janeiro: LTC**, 2009.
- [12] YOUNG IV, H. D. Física IV: Sears e Zemansky: ótica e física moderna/Hugh D. Young, Roger A Freedman; colaborador A. Lewis Ford; tradução Daniel Vieira; revisão técnica Adir Moysés Luiz. 2016.
- [13] CAMILO, Antônio Rafael Moreira. Tópicos de relatividade restrita. 2016.
- [14] NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de física básica: Ótica, relatividade, física quântica (vol. 4)**. Editora Blucher, 2014.
- [15] MARICONDA, Pablo Rubén; LACEY, Hugh. Galileu e a ciência moderna. **Cadernos de Ciências Humanas-Especiaria**, v. 9, n. 16, p. 267-292, 2006.
- [16] MARTINS, Roberto de Andrade. Física e história. **Ciência e Cultura**, v. 57, n. 3, p. 25-29, 2005.

[17] MOURA, Thiago Martiusi. **A teoria da Relatividade no Contexto Aeroespacial: Fenômenos, Efeitos e Aplicações**. 2010. 33 f. TCC (Graduação) - Curso de Bacharelado em Ciências Aeronáuticas, Universidade do Norte do Paraná, Londrina, 2010.

[18] CORREIA, L. V.; POULIS, F. P. O Sistema de Posicionamento Global (GPS) como aplicação prática da teoria da Relatividade Geral. **Revista Brasileira de Iniciação Científica**, v. 4, n. 6, 2017.